

## InN/Si タンデム形太陽電池の理論変換効率

山本 嵩 勇\*    北島 寛 之\*\*

### Theoretical Conversion Efficiency for InN/Si Tandem Solar Cell

Akio YAMAMOTO and Hiroyuki KITAJIMA

(Received Feb. 29, 1992)

A new tandem solar cell composed of InN cell as a top cell and Si cell as a bottom cell has been proposed, and theoretical analysis has been performed of conversion efficiency for the tandem cell with a 2-terminal or a 3-terminal structure from the view point of optimum cell structure design.

A conversion efficiency more than 30% is obtained provided that surface recombination velocity of InN is reduced to less than  $10^5$  cm/s and junction depth of InN cell to less than  $0.1\mu\text{m}$ . A 2-terminal cell is desirable to be operated under Air Mass (AM) 0 illumination rather than AM 1.5, because current matching is attained between the top and bottom cells under AM 0 condition. Conversion efficiency is increased by about 6% by operating the tandem cell under optical concentration of 1000 suns when the series resistance in the cell is less than  $0.01\ \Omega\text{cm}^2$ .

#### 1. 序論

石油を中心とする化石エネルギー資源の枯渇と、それらの大量消費の結果としての環境問題が重要な問題になっている今日、クリーンエネルギー源としての太陽光発電に大きな注目が集まっている。太陽電池がこのような期待に応えることができるためには、高効率化と低コスト化が必要であ

る。

これまで、太陽電池の高効率化については、使用する半導体の禁止帯幅が最適値に近いGaAsなどを用いた研究が進められ、最近では、20%をこえる変換効率が得られるようになった。しかし、このような単一接合の太陽電池の変換効率については、多くの見積りが報告されているが、約27%が限界であるとされている。そのため、単一接合太陽電池ではこれ以上の大幅な変換効率の向上は望めないことになる。

さらなる高効率化の実現には、禁止帯幅の異なる接合の多層化、すなわちタンデム化が有効とされ、各種の材料系での検討が開始されている。それらの中で、上部セルにAlGaAs, GaAsPなどのⅢ－Ⅴ族化合物半導体を、下部セルにSiを用いた2接合タンデム太陽電池が有望視されている[1,2,3]。

本研究の目的は、上部セルにInN、下部セルにSiを用いた、InN/Siタンデム形太陽電池を提案し、最適設計の観点から変換効率の見積とその支配要因の明確化を行うことにある。InNは、Ⅲ－Ⅴ族化合物半導体の一種であるが、これまでほとんど研究されてこなかった材料である。しかし、この材料は禁止帯幅約2eVをもつ唯一の2元系化合物であり、他の3元系材料のような組成制御が不要なことから大面積セルの製造に適していることに加え、Asなどの毒性元素を含まないことから環境汚染の心配がないという利点を持つ。

本報告では、2端子構造および3端子構造のInN/Siタンデム太陽電池について、変換効率に及ぼす膜厚、少数キャリア拡散長、表面（界面、裏面）再結合速度の影響を理論計算により明らかにする。さらに、タンデム太陽電池の高効率化、低コスト化に有利な集光動作特性についても述べる。

## 2．太陽電池の高効率化におけるタンデム化の有効性

太陽光スペクトルの利用の観点から、単一接合太陽電池の変換効率の限界とその改善策としてのタンデム太陽電池について考える。いま、禁止帯幅 $E_g$ の半導体に光が照射された場合を考える（図1a）。 $E_g$ 以上のエネルギーを持つ光子（エネルギー $h\nu$ ）は電子－正孔対を発生するが、余分な励起エネルギー、 $h\nu - E_g$ 、は熱損失となる。一方、 $E_g$ 以下のエネルギーの光子は電子－正孔対を発生できず透過してしまい利用できない。この状況において、太陽光スペクトルにおける太陽電池の利用エネルギーは、図1b)に示す斜線部分のみとなる。このように、単一接合太陽電池では利用できる太陽光エネルギーが限られてしまう。そこで、更に太陽光スペクトルの利用率を高め、変換効率を向上させる方法として、禁止帯幅 $E_{g1}$ の太陽電池の後方に禁止帯幅 $E_{g2}$ の太陽電池を配置すると（ $E_{g1} > E_{g2}$ ）、図1c)から分かるように、領域Ⅰに加えて領域Ⅱのエネルギーが利用できることになり、利用面積が増大する。このように、禁止帯幅の異なる太陽電池を多層化することによって、太陽光スペクトルの利用率が向上し、総合効率は増加することになる。このように、効率向上にはタンデム化が有効な方法である。

タンデム形太陽電池については、禁止帯幅の大きい半導体からなるバルク形太陽電池を薄片化し、これを禁止帯幅の小さい太陽電池の上に接着するメカニカルスタック法と、禁止帯幅の小さい太陽

電池上に禁止帯幅の大きい薄膜太陽電池を直接結晶成長させるモノリシック法が研究されている。前者は、バルク形太陽電池の薄片化という高コストのプロセスを必要とするほか、上部セル材料の選択幅が狭いという問題がある。一方、後者については、上下セル材料の格子整合の問題はあるものの、格子不整合系でのヘテロエピタキシャル成長技術が確立できれば、その量産性、信頼性を考慮すると、将来性のある技術に発展すると考えられる。本研究で提案する  $\text{InN}/\text{Si}$  タンデム太陽電池は、モノリシック形を志向したものである。

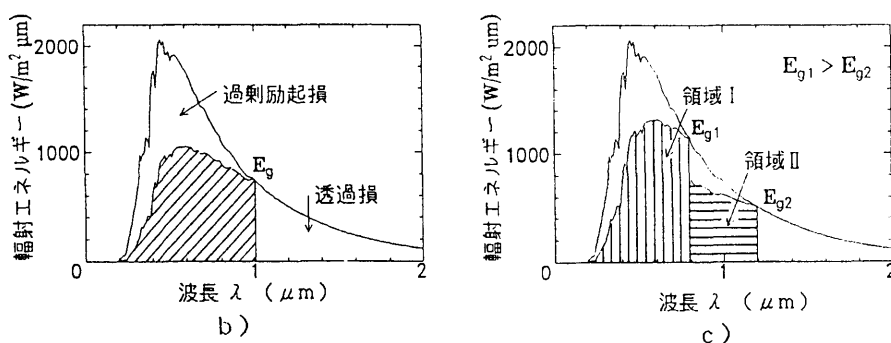
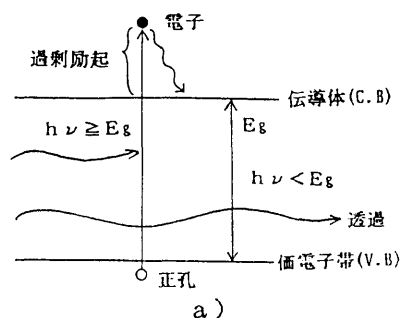


図1 太陽電池の損失要因と  
太陽光スペクトルの有効利用  
による高効率化

### 3. 解析方法

解析に用いた太陽電池モデルは、 $\text{nppn}$ の三端子構造、及び $\text{nnpnp}$ の二端子構造である。これらのバンド図をそれぞれ図2、図3に示す。

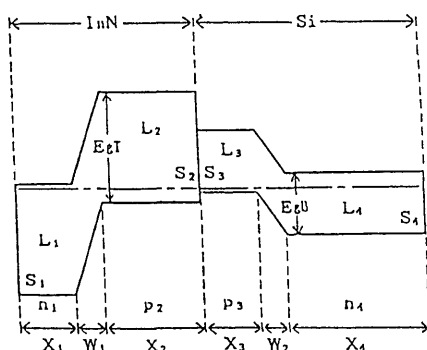


図2 三端子構造のバンド図

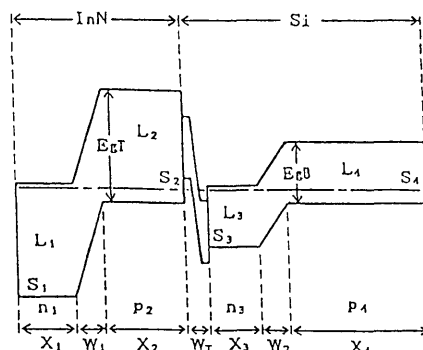


図3 二端子構造のバンド図

解析は、少数キャリア連続の方程式において、過剰少数キャリアの時間的変化や外部電界Eを含まない、

$$D \frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{p - p_0}{\tau} + (1 - R) F(\lambda) \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] = 0 \quad (1)$$

の式を太陽電池の各層に対して、境界条件のもとで解き、過剰少数キャリア濃度  $\Delta p = p - p_0$  を求めた。ここで、 $x$  は表面からの深さ、 $R$  は反射率、 $\alpha(\lambda)$  は波長  $\lambda$  での吸収係数、 $F(\lambda)$  は波長  $\lambda$  での光子数、 $\tau$  は少数キャリア寿命である。これより各層での短絡光電流密度  $J_{sc}(\lambda)$  を求めた。なお、接合の空乏層については、空間電荷による強い内蔵電界のため、少数キャリアの再結合はほとんど無視できることから、励起される少数キャリアはすべて光電流になるとして求めた。

短絡光電流  $I_{sc}$  は、各層での短絡光電流密度の和  $\sum J_{sc}(\lambda)$  を太陽光スペクトル（大気圏外スペクトル；AM0）について積分して求めた。

$$I_{sc} = \int_0^{\lambda_0} \sum J_{sc}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

飽和電流  $I_0$  は、(1)式のキャリア発生項を含まない、

$$D \frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{p - p_0}{\tau} = 0 \quad (3)$$

より、光電流と同様にして求めた。

これらより、太陽電池の電流（I）－電圧（V）特性が次のように求まる。

$$I = I_{sc} - I_0 \left[ \exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{kT} \right\} - 1 \right] \quad (4)$$

ここで、 $q$  は電子の電荷、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度、 $R_s$  は直列抵抗である。この式を上層セルと下層セルにそれぞれ単独に用いて計算を行う。物性定数として、吸収係数  $\alpha$  [4, 5]、真性キャリア密度  $n_i$ 、少数キャリア拡散定数  $D$ 、少数キャリア拡散長  $L$ 、等価状態密度  $N_c$ 、 $N_v$  を考慮した。

二端子構造における電流（I）－電圧（V）特性は

$$I = I_{ss} - \sqrt{I_{0t} I_{0b}} \left[ \exp \frac{q(V + V_j + R_s I)}{2kT} \right] \quad (5)$$

である。ここで、 $I_{ss}$  は上、下セルで発生する光電流の小さい方、 $V_j$  は上部セルで発生した光電流がトンネル接合部を流れる際に発生する電圧降下分である。

太陽電池の最大出力  $P_m$  は

$$P_m = I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF \quad (6)$$

で表される。

又、変換効率  $\eta$  は、二端子構造においては

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (7)$$

であり、三端子構造においては

$$\eta = \eta_t + \eta_b = \frac{P_{mt} + P_{mb}}{P_{in}} \quad (8)$$

である．ここで、添え字 t は上部セル、添え字 b は下部セルである．ただし、 $P_{in}$  は入射エネルギーで、 $P_{in} = 135 \text{ mW/cm}^2$  である．

## 4. 結果及び考察

### 4.1 2 接合タンデムセルにおける上下セルの禁止帯幅の組み合わせと変換効率

#### a) 三端子構造

三端子構造 (np-pn) のときの高変換効率を得られる禁止帯幅の組み合わせ領域を図4に示す．この結果から、最適禁止帯幅の組み合わせは  $(E_{gt}, E_{gb}) = (1.95 \text{ eV}, 1.07 \text{ eV})$  である．30% を越える領域は、 $E_{gt}$  は 1.9~2.0 eV、 $E_{gb}$  は 1.0~1.15 eV である．次に示す二端子構造の場合に比べると、三端子構造では上下セルの出力が別々に取り出されるので、高変換領域が広がっている．

#### b) 二端子構造

二端子構造 (np-np) のときの高変換効率領域を図5に示す．最適禁止帯幅の組み合わせは、 $(E_{gt}, E_{gb}) = (1.8 \text{ eV}, 0.9 \text{ eV})$  であり、その組み合わせでの効率は 29% である．三端子構造と比較して、高変換効率領域は狭くなり効率も小さくなっていることが分かる．その理由は、トンネル接合によって2つの太陽電池が直列に接続されているため、電流整合の条件からそれぞれのセルが作る光電流の内、小さい方が全体の光電流となるからである．その電流整合の条件を明らかにするため、下部セルを Si に固定し、上部セルを禁止帯幅の異なる直接遷移形半導体と仮定した場合の出力パラメータの上部セル禁止帯幅依存性を図6に示す．この結果から明らかなように、電流整合のとれる  $(J_{st} = J_{sb})$  禁止帯幅において効率は最大となる．

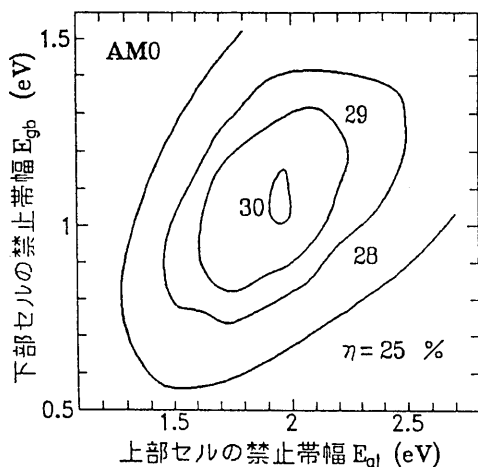


図4 三端子構造の時の禁止帯幅の組み合わせによる高変換効率領域

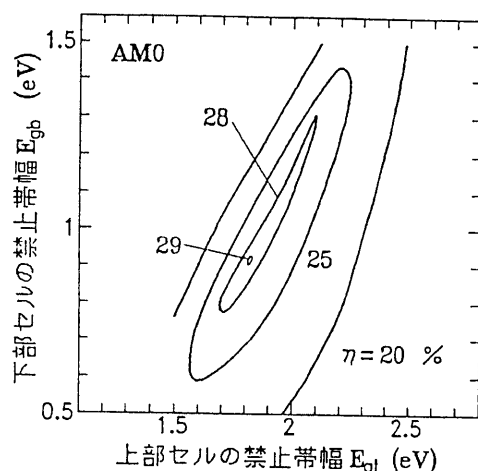


図5 二端子構造の時の禁止帯幅の組み合わせによる高変換効率領域

#### 4.2 タンデムセル用半導体材料の検討

IV族およびⅢ-V族化合物を中心とした半導体の格子定数と禁止帯幅の関係を図7に示す。前節で述べたように、高変換効率が期待できる禁止帯幅の範囲は $E_{gt}$ ; 1.8~2.0eV,  $E_{gb}$ ; 0.9~1.2eVである。この領域内に存在する材料としては、上部セルにはInN, GaAsP, GaAlAs, InGaP, InGaAsPなどが挙げられ、下部セルにはSi, GaInAs, InAsPなどが挙げられる。

下部セルの材料としては、間接遷移半導体である禁止帯幅1.1eVの「Si」が有望である。Siは太陽電池技術がほぼ確立されており、資源的に豊富で低コストであり、また、耐熱性に優れているという多くの利点を持つ。さらに近年、Si基板上への化合物半導体薄膜のヘテロエピタキシャル成長の研究が活発になり、数%の格子不整合の存在でもSi基板上に高品質の化合物半導体薄膜が形成できる見通しが出てきたため、上部セル材料選択の幅が広がったことから有望な材料と言える。

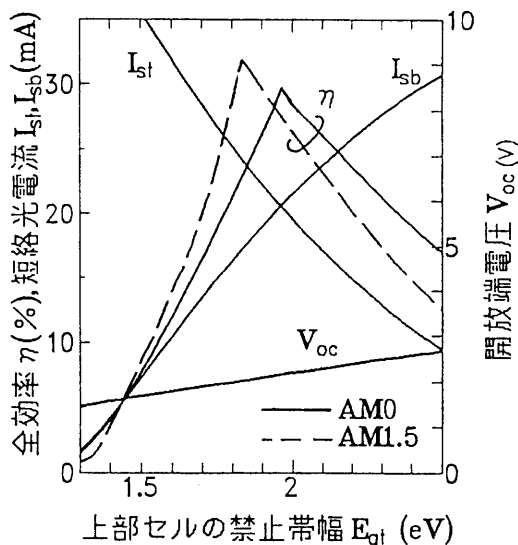


図6 出力パラメータの上部セルの禁止帯幅依存性〔下部セル (Si) 〕

上部セルの材料としては、直接遷移半導体である「InN」が有望である。なぜなら、すでに述べたように、この材料は  $E_g \sim 2\text{ eV}$  の唯一の2元系材料であり、他の3元系材料のような組成制御が不要なことから大面積セルの製造に適しており、また、毒性元素を含まないことから環境汚染の心配がないという利点を持つからである。

上記のような理由により、上部セルに「InN」を、下部セルには「Si」を用いた InN/Si タンデム形太陽電池を提案し、その最適設計の観点から、変換効率の理論的検討を行う。

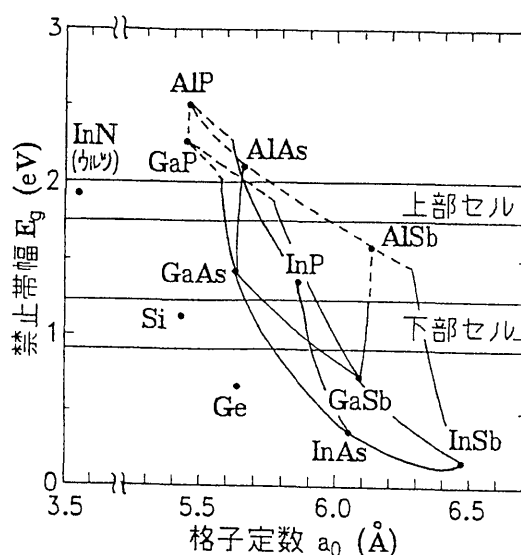


図7 禁帯幅と格子定数

#### 4.3. InN/Si タンデム形太陽電池の変換効率

太陽電池の変換効率の支配要因としては、接合深さ、少数キャリア拡散長および表面（界面）再結合速度などが考えられる。以下に、三端子構造、二端子構造に分けて、これらの要因の影響を定量的に明らかにする。

##### a) 三端子構造

Si 下部セルの構造を固定した場合の InN 表面再結合速度  $S_1$  をパラメータとした全変換効率  $\eta$  の InN セル接合深さ  $x_1$  依存性を図8に示す。 $x_1$  が大きくなると、 $S_1$  の影響を大きく受けるため  $\eta$  が低下する。 $S_1$  が  $10^5\text{ cm/s}$  以下ではその低下は小さく、 $x_1 \sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$  でも30%以上の  $\eta$  が得られる。InN の表面再結合速度については測定例がないため不明であるが、InP 程度に小さいことが望まれる。 $S_1$  が大きい場合の  $\eta$  の低下の原因を明らかにするため、各出力パラメータの InN セル接合深さ  $x_1$  依存性を調べた。結果を図9に示す。 $\eta$  の低下は上部セルの短絡光電流  $I_{sc}$  の低下が原因している。これは、光キャリアが接合に届くよりも、InN 表面で再結合する割合の方が大きくなるためである。

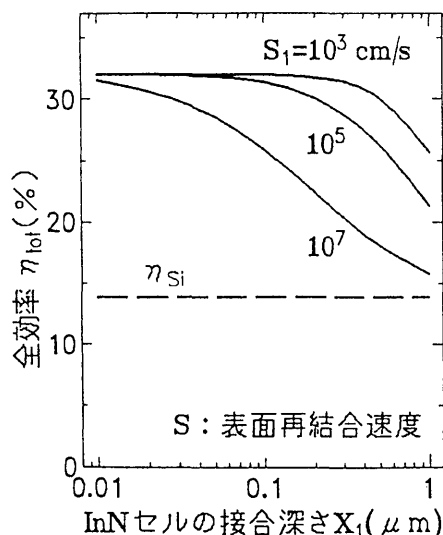


図8 InNセルの表面再結合速度  $S_1$  をパラメータとする変換効率の接合深さ  $x_1$  依存性

InN上部セルの構造を固定した場合のSi界面再結合速度 $S_3$ をパラメータとする変換効率 $\eta$ のSiセル接合深さ $x_3$ 依存性を図10に示す。接合深さ $x_3$ が $1\mu\text{m}$ でも30%の効率を得られ、又、 $S_3$ が $10^3\sim 10^7\text{cm/s}$ と大きく変化しても変換効率にほとんど影響はない。これらの原因は、図11の分光感度特性から明かなように、波長約 $0.6\mu\text{m}$ 以下の短波長光はInNセルでほとんど吸収されることに加えて、Siの吸収係数が小さいためSiセルのp層ではほとんど光電流 $J_{n2}$ が発生しないことによるものである。

図11の分光感度特性からわかるように、光キャリアのほとんどは、InNセルでは表面側のn層で、Siセルでは裏面側のn層で発生している。このことは、変換効率は両n層の正孔拡散長に大きく依存し、逆に、両p層の電子拡散長にはほとんど依存しないことを意味している。InNセルのnおよびp層の少数キャリア拡散長による出力パラメータの変化をそれぞれ図12、13に示す。予想されたように、出力パラメータは $L_2$ よりも $L_1$ に大きく依存する。

以上示したように、一般に、InN上部セルに比べて、Si下部セルでは変換効率の構造依存性が小さく、その設計条件はかなり緩やかである。

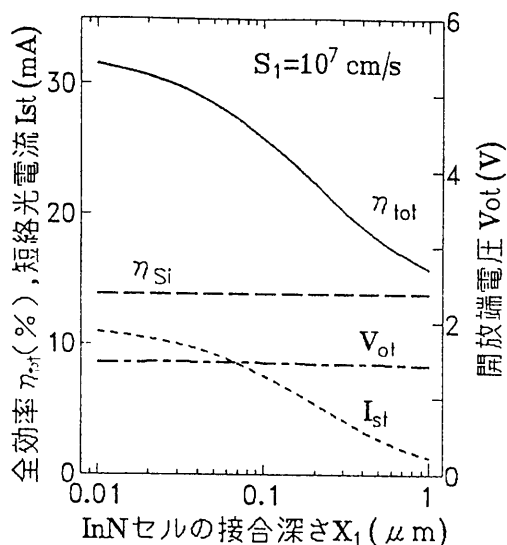


図9 InNセルの表面再結合速度 $S_1=10^7\text{cm/s}$ の時の各パラメータの接合深さ $x_1$ 依存性

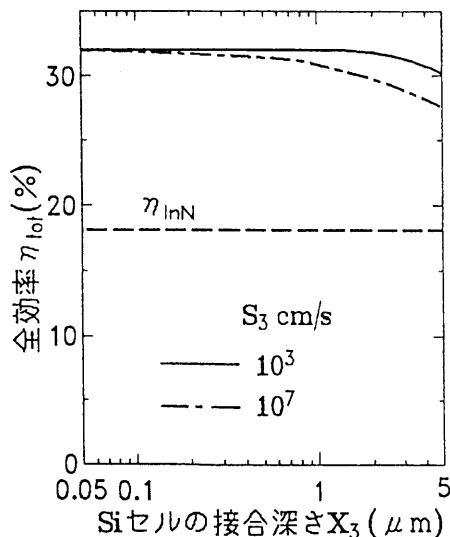


図10 Siセルの表面再結合速度 $S_3$ をパラメータとする変換効率の接合深さ $x_3$ 依存性

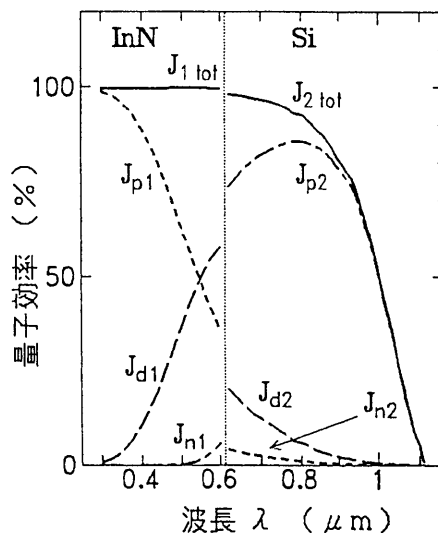


図11 分光感度特性



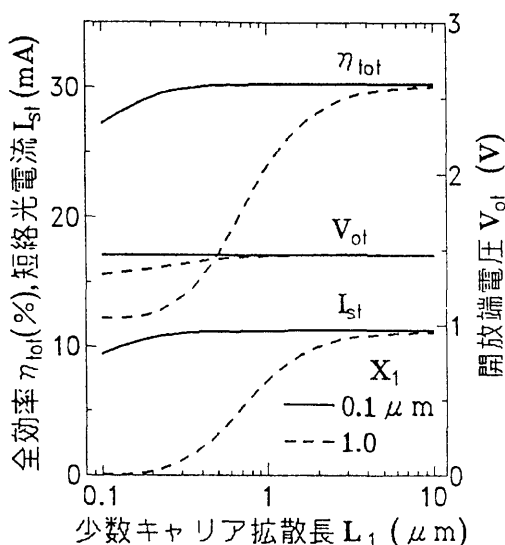


図12 InNセルのn層の  
少数キャリア拡散長 $L_1$ による  
出力パラメータの変化

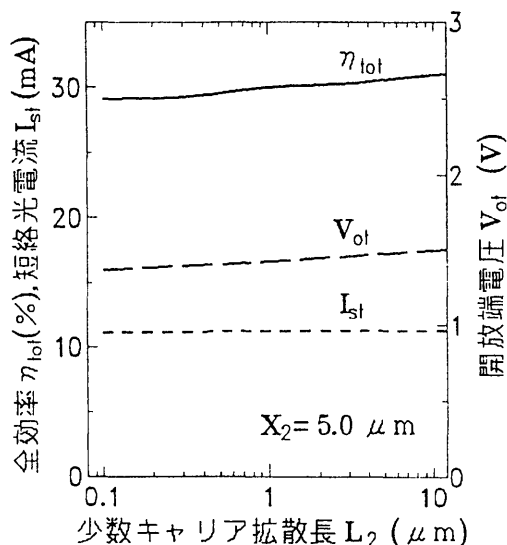


図13 InNセルのp層の  
少数キャリア拡散長 $L_2$ による  
出力パラメータの変化

#### b) 二端子構造

下部セルをSi ( $E_g=1.1\text{eV}$ ) としたときの  
上部セルの禁止帯幅 $E_{gt}$ に対する出力パラメ  
ータの変化を、すでに、図6に示した。この結果  
から、上部セルにInN ( $E_g\sim 2\text{eV}$ ) を用いた  
場合、AM0ではほぼ最適禁止帯幅となるが、  
AM1.5では電流整合のとれる禁止帯幅から  
約0.15eV大きいことが分かる。よって、上下  
セルで発生する電流に差を生じ、この差は無効  
になる。従って、二端子構造として使用する場  
合は、AM0の条件の方が好ましいといえる。

AM0, AM1.5の両条件において、上部セ  
ルで作られる電流 $I_{st}$ の方が小さいため、電流  
整合の条件から、この上部セルの発生電流が全  
体の電流となる。すなわち、全効率 $\eta$ は上部セ  
ルに大きく支配されることになる。

各出力パラメータのSiセル接合深さ $x_3$ 依存  
性を図14に示す。この場合、InNセルの構  
造は固定されているので上部セルの短絡電流 $I_{st}$

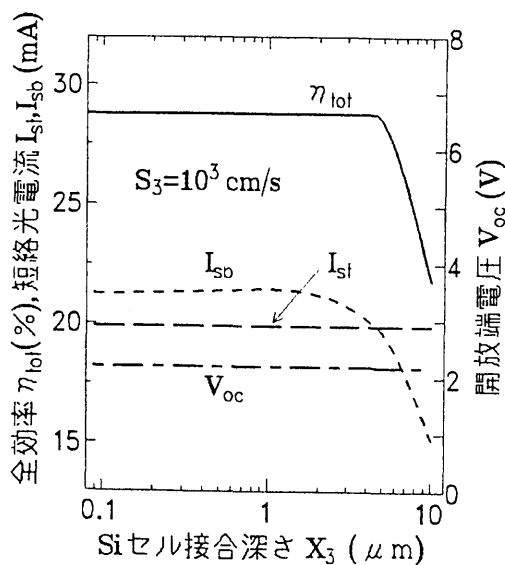


図14 各出力パラメータの  
Siセル接合深さ $x_3$ 依存性  
(二端子)

は一定である。下部セルの短絡光電流  $I_{sb}$  は、 $S_3$  の影響を受け、 $x_3$  が増大するに従い低下する。効率  $\eta$  は、電流整合の条件によって、小さい方の短絡電流で決定される。従って、接合深さ  $x_3$  が小さい場合は  $I_{nN}$  上部セルで効率が決定され、 $S_3$  の影響を受けない。

#### 4.3. 集光動作

太陽電池の集光動作は、レンズなどによって光を集光して照射するもので、セル面積が低減できることからコスト低減というメリットがあるばかりでなく、以下に説明するように、変換効率の向上が期待できる。集光によってセルの単位面積当たりの入射光子数を増加させると、短絡電流は集光度に比例して増加する。一方、開放端電圧は短絡電流の対数に比例して増大する。したがって、開放端電圧の上昇分だけ変換効率は向上する。

集光動作ではセルの出力電流が大きくなるため、セルの直列抵抗による効率低下が重要な問題となる。

直列抵抗  $R_s$  をパラメータとした集光度に対する変換効率の変化を図15に示す。 $R_s \sim 0$  のとき、1000倍集光で約6%の変換効率の向上が見込める。 $R_s \neq 0$  のとき、発生光電流に比例して電圧降下分が増大し、それによって、曲線因子の低下をもたらす変換効率が低下する。図15の結果から、集光動作のメリットを引き出すためには、 $R_s < 0.01 \Omega \text{cm}^2$  以下にする必要があることがわかる。

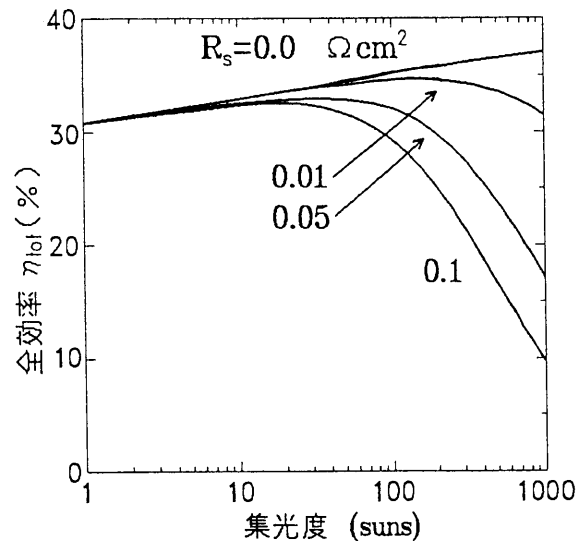


図15 直列抵抗  $R_s$  をパラメータとした集光度に対する変換効率の変化

## 5. まとめ

将来性のあるタンデム形太陽電池として、InN/Si タンデム形太陽電池を提案し、その最適設計の観点から、変換効率に対する膜厚、少数キャリア拡散長、表面（界面、裏面）再結合速度の効果を理論的に明らかにした。高効率化には、InNセルの表面再結合速度 $S_1$ は $10^5 \text{ cm/s}$ 以下であることが望まれ、 $S_1$ の影響を低減するためにInNセル接合深さ $x_1$ は $0.1 \mu\text{m}$ 以下にする必要がある。短波長光はInNセルでほとんど吸収されること、Siの吸収係数が小さいことから、変換効率 $\eta$ がSiセルの界面再結合速度 $S_3$ の影響をほとんど受けないことが明らかになった。二端子構造の場合、電流整合の条件からInNセルで作られる電流の方が小さいため出力電流はInNセルの発生電流で制限されることが明かとなり、さらに、太陽光スペクトルとしてはAM1.5よりもAM0の方が適していることが明らかになった。

InN/Si タンデム形太陽電池を集光動作させた場合、直列抵抗 $R_s$ が $0.01 \Omega \text{ cm}^2$ 以下であれば、1000倍集光で約6%の変換効率の向上が期待できることが明らかとなった。

現在、InN/Si タンデム形太陽電池の実現を目指して、Si(111)基板上へのInN(0001)のヘテロエピタキシャル成長の検討[6]が進められており、本研究の成果は将来のセル構造設計に有効に反映されるものと思われる。

## 参考文献

- [1] T. Nishioka et al., Technical Digest of the International PVSEC-3, Tokyo, 545 (1987)
- [2] 梅野他, 文部省科学研究費補助金重点領域研究 エネルギー変換と高効率利用  
「エネルギーの変換技術」 平成3年度研究成果報告書, 97 (1992)
- [3] Y. Komatsu et al., Technical Digest of the International PVSEC-5, Kyoto, 443 (1990)
- [4] H. J. Hovel and J. J. Cuomo, Appl. Phys. Lett., 20, 71 (1972)
- [5] 高橋清, 浜川圭弘, 後川昭雄著 「太陽光発電」 森北出版 p.49, (1980)
- [6] 山本他, 第38回応用物理学関係連合講演会予稿集 No.1, 28pZV-15, 238 (1991)

